

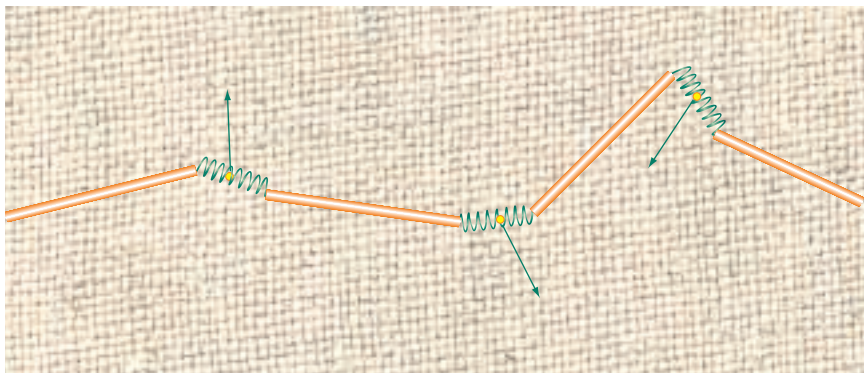
des pièces de tissu. Pour déterminer les comportements des tissus aux plus grandes perturbations, plusieurs approches ont été testées. La méthode des éléments finis, tout d'abord, divise les fils en nombreuses petites zones et calcule la déformation de chacune, à partir des lois de déformation des fils. Toutefois le nombre de calcul augmente considérablement avec la taille du tissu modélisé ; en pratique, les modélisations sont limitées à quelques centimètres carrés.

Une autre approche consiste à conserver la loi de comportement donnée par l'analyse précédente et à compléter la description : on considère une cellule du tissu sous la forme d'une boîte fictive qui entoure une ondulation du fil. La microrotation du modèle continu peut alors être identifiée avec la rotation de la cellule de base par rapport à l'axe fixe horizontal, et représente en quelque sorte l'ondulation du fil au deuxième ordre de grandeur. De même, il est raisonnable de penser que les bosselures présentes dans le premier stade de déformation en traction sont associées à des ondulations d'ordre supérieur.

Gauchissement et éléments finis

Considérons alors une contrainte appliquée aux extrémités du fil, et supposons que le fil soit inextensible : la longueur de la cellule de base ne varie pas. La déformation dans la direction de traction provient alors de la diminution de la microrotation, diminution qui résulte du moment induit par la contrainte appliquée sur la cellule de base. La contrainte externe se transmet en effet le long du fil, et la cellule de base est soumise à un couple de contraintes, ayant pour bras de levier la demi hauteur d'ondulation. Cet exemple révèle bien l'origine microscopique des variables cinématique (microrotation) et statiques (couples de contraintes) de la loi de comportement micropolaire. La courbe unidimensionnelle de traction obtenue par la théorie reproduit bien la courbe mesurée, et cette analyse rend compte de façon quantitative de la courbe de traction d'un tissu.

Une des difficultés de la réalisation de vêtements est liée au caractère non développable des surfaces textiles : la



5. LE FIL des tissus est considéré par l'analyse non standard comme un ensemble de tiges indéformables (*en rouge*) reliées par des ressorts (ainsi, on tient compte de l'élasticité des fils). Les contraintes exercées par les fils transverses sont représentées par des forces agissant entre les tiges, sur les ressorts (*en vert*). On obtient ainsi des équations qui décrivent la mécanique des fils (par exemple, la somme des sinus des angles que font les tiges avec l'horizontale est nulle). L'analyse classique obtient le comportement réel du fil en faisant tendre la longueur des tiges vers zéro, mais elle perd ainsi la possibilité de considérer des échelles intermédiaires. Quand l'analyse non standard fait tendre la longueur des tiges vers zéro, elle conserve la possibilité de décrire simultanément des phénomènes à des échelles différentes : par exemple, une raideur du fil variable (constantes de raideur des ressorts différentes selon les tiges).

surface ne peut être déployée sur un plan sans coupure. Il faut alors savoir où et comment découper les pièces à plat qui constitueront le patron afin de minimiser la quantité de tissu utilisée, tout en obtenant une résistance aux déformations satisfaisantes. De surcroît, les utilisateurs de tissus se fondent sur les gauchissements que peuvent prendre les tissus au cours de leur assemblage : la souplesse du tissu est souvent mise à profit pour raccorder les différentes pièces.

Pour prévoir le comportement des tissus, aucune des approches précédentes ne suffit, car le gauchissement, par exemple, correspond à une déformation hors du plan du tissu. Aussi doit-on utiliser alors des techniques de

calcul numérique par éléments finis, qui divisent le tissu gaucho en un grand nombre de cellules, calculent les déformations pour chaque cellule et remontent ensuite au comportement global. L'analyse micromécanique, aux petites ou aux grandes perturbations, sert alors à décrire les petits éléments.

Aujourd'hui la méthode des éléments finis donne une bonne description de petites pièces de tissu et l'on cherche à étendre la taille des pièces décrites.

L'intégration d'une modélisation mécanique dans les programmes de conception assistée par ordinateur constituerait un progrès de taille dans l'industrie de la confection. C'est un travail en cours.

Jean-François GANGHOFFER est chercheur en mécanique et en science des matériaux à l'Institut de chimie des surfaces et interfaces (CNRS), à Mulhouse. Massimo MAGNO est chercheur à l'École nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse et au Laboratoire de mathématiques et applications de l'Université de Haute-Alsace.

B. OLOFSSON, *A General Model of a Fabric as a Geometric-mechanical Structure*, in *Journal of the Textile Institute*, p. 541, 1964.

A. ASKAR et A.S. Cakmak, *A Structural Model of a Micropolar Continuum*, in *Int. J. Engng. Sci.*, vol. 6, p. 583, 1968.

I.P. VAN DER BERG, *On the Relation between Elementary Partial Difference Equations and Partial Differential Equations*, in *Annals of Pure and Applied Logic*, vol. 92, pp. 235-265, 1999.

Massimo MAGNO, *Modèle mécanique du comportement de structure souple aux échelles mésoscopique et macroscopique : application aux matériaux fibreux*, Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur de l'Université de Haute-Alsace, 1999.

Corinne JUNG, *Analyse micromécanique du comportement d'un tissu, cas de l'armure toile*, Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur de l'Université de Haute-Alsace, 1999.



Des tissus aux couleurs changeantes

SERGE BERTHIER • JACQUES LAFAIT

L'étude des structures microscopiques des ailes de papillon a fourni les clés des couleurs iridescentes. On tente de créer des tissus qui ont des structures et, par conséquent, des couleurs comparables.

L'iris est la partie colorée de l'œil ; c'est aussi l'ensemble des couleurs de l'arc-en-ciel (pour les Grecs, la déesse Iris était la personnification de l'arc-en-ciel). L'iridescence est la propriété des objets qui imitent l'iris : le physicien qualifie d'iridescent tout objet dont la couleur varie avec l'angle d'incidence des rayons lumineux qui l'éclairent ou avec l'angle d'observation. Le phénomène est assez fréquent dans la nature, mais il est surtout intense chez certains insectes (des coléoptères et des lépidoptères diurnes) ou chez quelques oiseaux. De nombreux physiciens se sont intéressés au phénomène et en ont cherché l'explication. Parce qu'elles ont révélé les structures responsables du phénomène physique, les techniques d'imagerie électronique ont dévoilé les secrets de l'iridescence.

Les papillons, qui utilisent presque tous les phénomènes physiques de variation des couleurs

et y associent parfois des pigments, représentent un excellent modèle de l'iridescence. Ils ont fait naître dans l'imagination des physiciens l'idée d'appliquer le phénomène à des tissus fabriqués avec des fibres dont la structure serait proche de celle des ailes de papillon. Pour comprendre quel serait l'aspect de tels tissus, examinons ce qu'est l'iridescence des ailes de papillon, et comment on peut appliquer les enseignements tirés d'une telle étude à l'élaboration de tissus d'un type nouveau.

L'origine des couleurs

Quand elle n'est pas due à un pigment, la couleur naît d'un des quatre phénomènes physiques suivants : la réfraction, les interférences, la diffraction et la diffusion. Cette séparation est plus historique que physique, car, si les formalismes sont souvent différents, les phénomènes sous-jacents se ressemblent. Tous reposent sur l'interaction d'une onde électromagnétique avec les atomes qui constituent les matériaux colorés. La distinction dépend de la taille et de la forme des structures où a lieu l'interaction.

Le phénomène de réfraction sépare la lumière blanche en ses divers constituants. Lorsqu'un faisceau lumineux traverse un prisme, l'angle de déviation des rayonnements qui le composent est proportionnel à la différence d'indice de réfraction du premier milieu traversé et de celui du prisme. Dans le verre, l'indice de réfraction de la lumière visible diminue continûment lorsque

la longueur d'onde augmente, c'est-à-dire du violet au rouge : les rayons situés du côté rouge du spectre sont moins déviés que ceux du côté violet. De tous les phénomènes évoqués, c'est le seul qui ne soit pas utilisé chez les papillons.

Les réseaux, systèmes constitués d'un grand nombre d'objets diffractants régulièrement espacés, décomposent également la lumière, et les papillons utilisent le phénomène. Dans les réseaux par transmission, ces objets, nommés traits, sont des fentes séparées par des zones opaques ; dans les réseaux par réflexion, tels ceux des papillons, ce sont des miroirs. Lorsqu'une onde électromagnétique atteint un tel réseau, elle est diffractée dans toutes les directions de l'espace par chaque trait, qui agit comme une source de lumière secondaire : les ondes sortantes interfèrent. Pour une longueur d'onde donnée, ces interférences sont alternativement constructives (c'est-à-dire que l'on observe effectivement une lumière) et destructives, c'est-à-dire que l'on n'observe plus rien, selon la direction d'observation (voir l'encadré page ??).

En lumière blanche, les rayonnements qui ont la même longueur d'onde interfèrent de façon constructive dans des directions qui dépendent de cette longueur d'onde. Ainsi, selon la direction d'incidence de la lumière par rapport au réseau, la couleur qui émerge du réseau varie : il y a bien iridescence. Les directions correspondant à des interférences constructives ne dépendent que du pas du réseau (l'intervalle entre deux traits) et de l'angle d'incidence de la lumière sur le réseau.

Le déphasage entre deux ondes issues de deux traits adjacents varie comme le sinus de l'angle d'incidence (c'est-à-dire dans le même sens que l'angle lui-même), et les interférences sont constructives lorsque ce déphasage est égal à un nombre entier de longueurs d'onde ; contrairement au prisme, le rouge est plus dévié que le bleu. Les réseaux que l'on observe chez les papillons comptent environ 1 000 traits par millimètre, ce qui les rend facilement observables au microscope

optique. Or, les ailes de papillon sont pourvues de telles structures en réseaux : la diffraction intervient dans l'iridescence.

Les interférences de films minces sont une autre source de variations des couleurs. Ce sont elles qui créent les irisations sur les bulles de savon ou sur les films d'huile, par exemple.

La couleur naît à nouveau de l'interaction de deux ondes en déphasage constructif. Quand on observe un film en réflexion, les couleurs naissent des interférences entre l'onde directement réfléchiée par la face supérieure du film et celle qui pénètre dans le film et est réfléchiée par sa face inférieure. Le déphasage, qui dépend de l'épaisseur optique du film, varie, ici, comme le cosinus de l'angle de réfraction : la longueur d'onde donnant des interférences constructives diminue quand l'angle d'incidence augmente.

De surcroît, l'épaisseur d'un film d'interférences observé en réflexion, dans une direction particulière, et qui éteint une longueur d'onde donnée, est de l'ordre du quart de cette dernière. Dans le spectre visible, cette dimension est donc de l'ordre de 100 à 150 nanomètres (un nanomètre est un milliardième de mètre), c'est-à-dire bien inférieure à la résolution des microscopes optiques. L'ordre de grandeur de ces dimensions explique que certains physiciens du début du XX^e siècle soient restés sceptiques quant à l'origine interférentielle de l'iridescence des insectes.

La dernière source physique de coloration (dernière par l'ordre choisi ici, mais pas quant à son importance) est la diffusion. Les couleurs observées résultent de la diffusion de la lumière par les petites particules, par exemple les poussières ou les gouttelettes d'eau, en suspension dans les gaz. Une onde électromagnétique interagit d'autant mieux avec une particule que la



1. SELON L'INCIDENCE DE L'ÉCLAIRAGE, la couleur des ailes du papillon *Morpho menelaus* change : c'est le phénomène d'iridescence. Ici la même aile a été photographiée sous huit incidences différentes. Après avoir découvert ce qui, chez les papillons, engendre le phénomène, des physiciens tentent de le recréer sur des tissus.